

静电悬浮条件下的材料典型热物理性质测量

孙一宁^{1,2}, 王飞龙^{1,2}, 于强, 孙志斌¹, 翟光杰¹

(1. 中国科学院复杂航天系统电子信息技术重点实验室 中国科学院国家空间科学中心 北京 100190;

2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 随着材料研究逐渐深入, 材料制备和材料分析的方法越来越重要, 然而, 一些重要的物理性质是开展相关研究的基础。由于一些材料熔点高、难熔化, 同时, 传统手段无法避免容器壁的污染, 或者无法在真空条件下进行试验避免气体的污染, 或者由于实验性质原因只能测量特定的材料; 这些方法很难测量材料在高温下过热过冷阶段的热物理性质。本文系统介绍了静电悬浮技术这种新型的实现深过冷的方式, 达到对材料热物理性质进行测量的目的。静电悬浮技术使样品在两极板间悬浮, 在悬浮的状态下采用激光对样品进行加热, 使材料达到高温熔化, 同时进行热物性的测量。本文对比了几种实现测量典型热物理性质的方法, 了解静电悬浮的优势, 以及详细地介绍了静电悬浮技术对材料的熔体密度、热膨胀系数、表面张力和粘度系数以及比热的测量。

关键词 静电悬浮, 热物性测量, 密度, 热膨胀系数, 表面张力, 粘度系数, 比热

中图分类号: xxx 文献标识码: x 国家标准学科分类代码: xxx

Thermophysical Property Measurements by Electrostatic Levitation in Material Science

Sun Yining^{1,2}, Wang Feilong^{1,2}, Yu Qiang¹, Sun Zhibin¹, Zhai Guangjie¹

(1. Key Laboratory of Electronics and Information Technology for Space Systems, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: with the increasing learning of material science, material preparation and material analysis method, which is based on some important physical properties, is more and more important. But due to some material has the characteristics of high-melting-point, and considering the risk of pollution problems, some traditional methods cannot avoid contamination wall of container. Some can't operate under the condition of vacuum so to avoid the pollution of the gas. Or some due to Experimental Properties can only measure some of specific material. Those methods is difficult to measure the thermophysical property of materials in overcooling at high temperature. This paper systematically introduces the electrostatic levitator technology which complete measuring the thermophysical property of materials. Electrostatic levitator technology suspends samples between two plates, meantime heating the samples by three lasers, until the material melt at high temperature, and then measure the thermophysical property of materials. This paper compares several typical methods which could measure the thermophysical property of materials, introduces the advantages of electrostatic levitator technology and introduces how the electrostatic levitator technology measures the thermophysical properties in detail including: density, thermal expansion coefficient, surface tension and viscosity coefficient and specific heat measurement.

Key words: electrostatic levitator; thermophysical property measurements; density; thermal expansion coefficient; surface tension; coefficient of viscosity; specific heat

基金项目: 国家国际科技合作专项 (2011DFA10440) 资助项目; 中国科学院重大科研装备研制项目 (YZ200928) 资助项目; 中国科学院空间科学战略性先导科技专项 (XDA04078300) 资助项目

0 引言

新型材料的研发对于国防、航空航天、尖端工业等产业的发展具有至关重要的作用,在探索新材料的过程中,需要在高温环境中测量材料的物理性质,而在这样的高温条件下,测试的容器壁会污染样品,对精确测量产生很大的影响。无容器的技术使样品悬浮起来,在熔化和凝固的过程中免受容器壁的影响,进而采用非接触测量的技术通过一系列光学的方法来实时测量高温材料的内部结构和物理性质。无容器加工技术是空间材料科学发展的一个重要研究方向,美国、日本、欧空局都相继进行了空间无容器材料热物性测量技术的研究^[1-4]。

利用无容器的方法对材料样品的典型热物理性质进行测量,主要包括熔体密度、热膨胀系数、表面张力、粘度系数和深过冷比热。密度是物质的特性之一,一般来说,不论什么物质,也不管它处于什么状态,随着温度、压力的变化,体积或密度也会发生相应的变化,在各个方面都发挥着重要的作用。热膨胀系数是材料基本的热物性参数之一,是工程设计、精密仪器制造、焊接、材料制备等领域中的不可忽略的重要参数。表面张力是决定表面热力学及流体动力学过程的重要参数,从而对熔体表面相关工艺,如铸造、激光表面重熔、焊接及液体旋转制备工艺施加影响。粘度反映液态合金的流动性和微观结构^[5]。它们的大小及变化对合金熔化、充型、凝固合成过程都具有重要影响^[6]。比热是物质的热力学性质,反映材料温度随能量的变化情况^[7]。液态金属比热对于金属凝固过程的热力学计算及各种相变研究都具有重要的意义。同时,比热也是计算凝固过程形核率的前提。因此,在热物理性质中,比热容和半球的总发射率在研究材料深过冷阶段时是2个很重要的参数。

无容器材料热物性测量的主要技术方法有自由落体技术和悬浮技术^[8]。静电悬浮是进行测量方法中较先进的手段,可应用于无容器材料热物性测量。

1 经典无容器测量方法发展介绍

落管是一种自由落体的深过冷快速凝固技术。相对于其他几种常见的无容器测量方法,落管是无容器测量材料热物性方法中最早的方法。英国人 William Watts 于 1782 年申请了利用自由落体方法改善铅弹圆度的专利,这是最早将失重效应用于材料制备的例子。1956 年,美国人 Turnbull 设计并安装了世界上第一个锥形落管进行了 Fe-Ni 合金的过冷研究^[9]。经过数十年的发展,落管技术在微重力或者低重力环境中实现合金熔体的无容器凝固,可以将深过冷技术和急冷技术有机结合起来^[10-12],一般而言,落管能够获得比较大的过冷度,因此常用于研究液态金属的深过冷快速凝固^[11,13]。目前,世界上已投入运行的落管共有几十座。虽然落管是最好的失重和无容器方法之一,但是这种方法占地面积大,成本高而且实验时间短,大大增加了实验的局限性。

电磁悬浮的历史可追溯到 1923 年,由 Mack 提出利用高频电磁场对金属进行悬浮,并申请了“悬浮熔融”专利^[14]。首次悬浮试验是由 Okress 完成的,并对之进行了简要的理论研究,提出了电磁悬浮技术^[15]。50 年代末的 Comenetz 利用 450kHz10kW 的高频源成功地悬浮起几十种 10g 左右的金属球^[16]。1971 年,加拿大马可马斯特大学的 Lu 及其同事首次将电磁悬浮液滴振荡法运用于表面张力的测定^[17]。发展到今天,电磁悬浮技术一般应用于具有高磁导性的金属和具有高电导率的半导体材料^[18,19]。用交变磁场悬浮和加热金属材料,可在真空和保护气氛中工作,并且悬浮的过程中伴随着对材料的电磁搅拌、加热等。电磁悬浮也有缺点,它测出过冷度的大小受试样纯度的限制,且悬浮过程中熔体有一定程度的汽化,影响过冷态熔体比热的测量精度。

声悬浮技术是利用强声场产生的声辐射压力来平衡重力,从而实现物体的悬浮,它在材料热物理性质测定、凝固过程动力学和液体运动规律研究等领域具有广泛的应用。1934 年,King (L. V. King, 1934) 首次解释了声悬浮现象,也

带动力把声悬浮发展为一种特殊的实验技术的研究^[20]。与其他悬浮技术相比,声悬浮对样品的电学和磁学性质没有限制,因而能够处理不同类型的材料。由于声悬浮能力和稳定性受媒质气体温度变化的影响较大,研究对象主要集中在低熔点材料。利用声悬浮方法排除了有容器壁面接触对成核结晶的影响,可以对一些纳米流体的过冷度进行实验研究,分析超声场作用对流体液滴成核结晶的影响^[21]。但材料需要在气体环境下工作,无法避免外界对材料的污染,可悬浮各种材料,但悬浮力小且声波对熔融的材料有机械干扰。不适用于测量高温液态材料的热物理性质。

气动悬浮装置通过控制气体流量结合合理的喷嘴设计可使样品达到稳定悬浮,设备简单,操作方便,能够悬浮各种材料。1982年,在低压自由喷流的作用下,球形的固体样品能够被悬浮起来,并通过激光对其加热^[20]。气动悬浮技术对单个液滴具有良好的操控性,可以方便地研究冷却速率的影响。快速的冷却过程中,熔体容易达到较高的过冷度,是一个快速凝固的过程,微观组织结构会发生改变。但由于结晶潜热的释放造成了凝固液界面处过冷度降低,在单个晶粒与宏观样品中发现不规则共晶向规则共晶的转变,深过冷可以使合金凝固组织出现不规则共晶^[22]。气动悬浮装置在温度操控方面具有较大的优势,一旦达到较稳定的悬浮,可以使样品的热量得失将达到平衡,通过激光功率的控制,即可实现样品温度的控制。但是气悬浮需要在气体环境下工作,对样品凝固有扰动,也对于实现位置的精确控制有些难度。

2 静电悬浮测量方法发展介绍

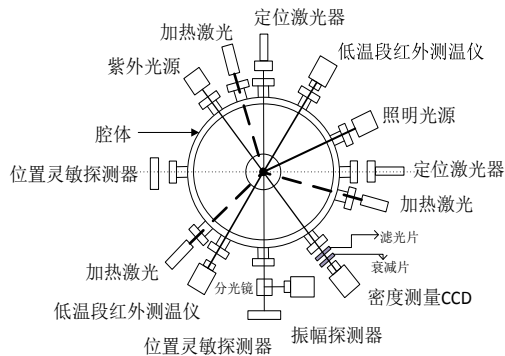
静电悬浮是在静电场中利用库仑力使样品悬浮从而实现无容器的一种技术。它为材料提供一个干净无干扰的环境,没有气体和电磁产生的对流的干扰^[23]。它适合于金属、半导体及绝缘体等所有能在表面保持足够实现悬浮的静电荷的材料。1959年,Lang-muir等^[24]研究了无反馈控制情况下微米直径的粒子的静电悬浮过程,这是静电悬浮在材料

科学领域的雏形。在1984年,美国加州理工学院下属的喷气推进实验室(JPL)的Rhim等人首先提出了静电悬浮的方法用于无容器材料加工,并直接应用于空间材料实验。JPL的静电悬浮位置控制系统先后设计了三种电极,并引入了反馈控制,实现了直径为5mm的镀银苯乙烯球求得稳定悬浮,并且利用抛物线飞机实现了直径约10mm的水滴在低重力环境中的稳定悬浮^[25]。进入20世纪90年代,静电悬浮技术开始逐渐茁壮发展。1993年,Rhim等人研制了地面条件下材料高温无容器处理的静电悬浮设备^[26]。该设备的位置控制系统采用位置灵敏探测器(PSD)进行悬浮样品的三维位置探测。2000年,NAKAMURA等人详细研究了静电悬浮炉的控制系统^[27],该系统采用垂直放置的两台500Hz频率的高速CCD进行悬浮样品三维位置探测。2001年T.Meister等人研究了针对于静电悬浮的增益调度控制方法^[28]。2005年Ishikawa等人给出了日本JAXA正在使用的静电悬浮炉结构^[29],该装置悬浮样品尺寸范围在0.9~3mm之间,采用PSD进行位置探测,控制算法为PID控制。目前日本宇航局(JAXA)已研制有地面用静电悬浮材料实验装置和航空机载静电悬浮实验装置^[30-34],其发展目标是成为空间无容器材料加工的重要装备。美国NASA采用静电悬浮技术的无容器材料加工能力同日本相当^[1]。

我国在静电悬浮方面的研究还处于起步阶段,但发展速度很快。西北工业大学的空间材料科学与技术重点实验室,经过10多年的研究,已经成功研制了一系列的静电悬浮实验的地面装置并实现悬浮。国家空间科学中心经过几年的研究成功实现了静电悬浮实验地面装置的悬浮加热控制以及进行经典热物性测量。图1是我国热物性测量原理示意图,一个不锈钢真空腔被放在在一个防震台的中间,样品被放置在2个极板间,其他观察、测量和加热设备环绕在腔体的周围。2组正交的激光和2-D位置检测器负责检测悬浮样品的位置。3组二极管激光器以两两夹角为120°。均匀分布被用来加热样品。使用2个测量不同温度范围的双波长测温仪测量温度。紫外光源和密度测量CCD相机用来测量样

品体积，计算样品的熔体密度；位置激光和振幅传感器用来测量样品振动，计算样品的表面张力和粘度系数；双波长测温仪采集的温度结合一路单波长测量值计算样品在不同温度的发射率，通过深过冷处理获取的降温曲线数据计算样品的深过冷比热。

图1 热物性测量实验装置示意



3 静电悬浮条件下测量经典热物性介绍

在静电悬浮条件下测量材料热物理性质已经可以很好的实现在许多高熔点的金属和非金属材料上。静电悬浮条件下，材料的整个处理过程可在高真空中进行，避免了介质对材料的影响。加热与悬浮独立控制，样品可在很大的温度范围内保持悬浮状态。采用反馈控制系统，可使样品保持静止，有利于对其加热和其熔体获得深过冷^[35]。避免了环境对样品的污染，这对于高温和高活性导电材料表面张力的测定非常意义。因为在高温下液态金属，极易与器壁反应，所以无容器处理消除了器壁引入的异质形核，液滴容易实现深过冷，这就使准确测量高温液态材料的热物理性质成为了可能。

3.1 熔体密度和膨胀系数测量

高熔点材料在静电悬浮炉中，让样品被加热到熔化时，可以通过密度测量 CCD 相机可以获得球形样品的剖面面积，根据悬浮溶融中球形样品的放大图像的轮廓可以求得体积 V ，计算方法如下：

$$R(\theta) = \sum_{i=0}^5 a_i P_i(\cos(\theta))$$

在表面带电的作用下，容器中悬浮的液体成为

球体，所以获取的投影图像得到球体的外轮廓圆，可解析半径 $R(\theta)$ ，计算求得体积 V 。求出体积，根据测量的质量值求出高熔点材料熔化后的密度。再结合双波长测温仪采集温度变化数据，可以通过如下膨胀系数公式：

计算出高熔点样品材料的膨胀系数。传统的方法很难在无接触容器壁或者不受到其他气体以及其他条件干扰的情况下测出相对准确的值。如下 2 张图分别是样品锆体积随温度变化的曲线图和热膨胀系数随温度变化曲线图。

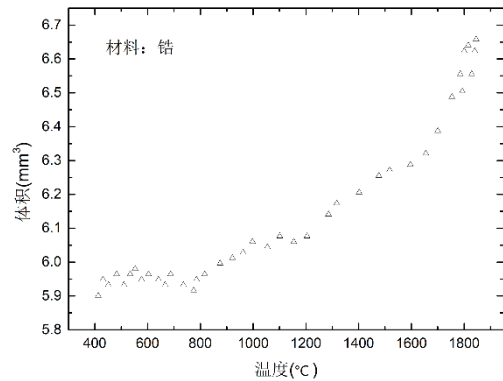


图4 样品体积随温度变化曲线

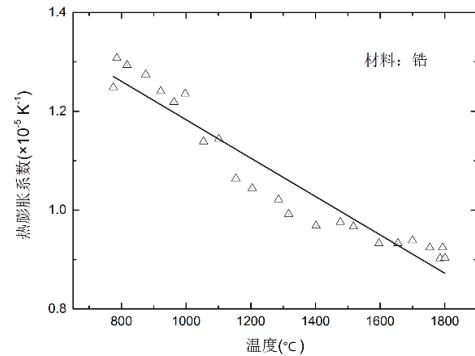


图5 样品热膨胀系数的变化曲线

3.2 表面张力和粘度系数的测量

在静电悬浮条件下，传统方法难以测量的高熔点材料表面张力测量和粘度系数的测量也可以实现。根据材料表面张力测量计算公式：

其中, ω_2 是熔体的固有振动频率, γ 是表面张力, ρ 是熔体密度, r_0 是样品球体半径。熔体密度 ρ 和球体半径 r_0 通过之前的密度测量得到, 求得熔体的固有振动频率 (共振频率) ω_2 , 即可求得熔体的表面张力 γ , 如下公式所示:

$$\gamma = \frac{1}{8} \omega_2^2 \rho r_0^3$$

粘度系数在液滴振动衰减的过程中, 液滴振动的衰减时间和粘度系数的关系如下公式所示:

τ_2 是撤除外部振动激励后的自由衰减时间, η 是粘性系数, ρ 是熔体密度, r_0 是样品球体半径。熔体密度 ρ 和球体半径 r_0 通过之前的密度测量得到, 求得熔体的自由衰减时间 τ_2 , 即可求得熔体的粘性系数 η , 如下公式所示:

$$\eta = \frac{\rho r_0^2}{5\tau_2}$$

所以, 知道固有振动频率 (共振频率) ω_2 和撤除外部振动激励后的自由衰减时间就可以求得表面张力和粘度系数。对于粘度较低的液体我们采用液滴振动法^[36], 液滴振荡法可得到熔融样品的固有振动数和衰减时间。液滴振荡法是以球状试验材料为前提的, 控制直流的静电悬浮域在悬浮液滴的共振频率附近, 激励液滴振荡。当激励停止后, 液滴继续在固有频率处继续震动, 此时的频率是由表面张力决定的衰减的时间是由粘度决定的。静电悬浮无容器方法悬浮的熔融材料几乎是球形, 悬浮位置控制稳定, 因此根据液滴振动的衰减可以测定表面张力和粘性系数。由位置激光和振幅传感器可以用来测量样品振动, 可以分析图片得到时间-振幅曲线。把一个带通傅里叶滤波器曲线上来去除有样品自身晃动所造成的低频振动, 滤波后的数据跟由振动引起的阻尼常数和频率的波形模板进行拟合, 可以得到数据计算表面张力和粘度系数。以金属钇为例, 可以求出静电悬浮下样品钇小球的表面张力和粘度系数随温度变化的曲线^[37], 如图 7 和图 8 所示。

表面张力和粘度系数的测量同样可以是一段

温度范围内的包括深过冷阶段。一直以来 JAXA 测量了一系列表面张力和粘度系数的数据, 例如像纯净的金属熔化后的表面张力, 就跟温度呈现线性关系, 随着温度的升高, 表面张力下降。被研究的金属在熔点温度时的粘度系数的数据很是缺乏, 通过静电悬浮的方法就能填补空缺。据数据表明在纯金属熔化状态温度和粘度系数也成反比, 随着温度的升高粘度系数下降。

图 6 样品钇表面张力的变化曲线

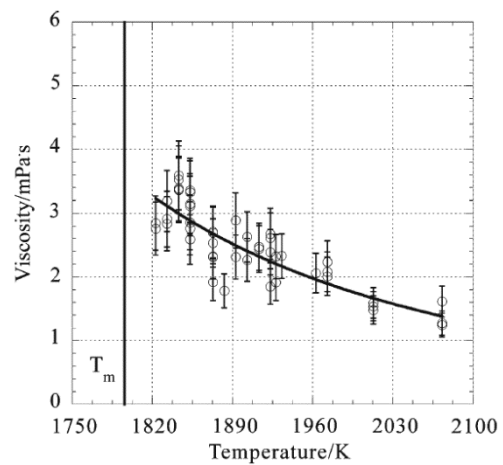
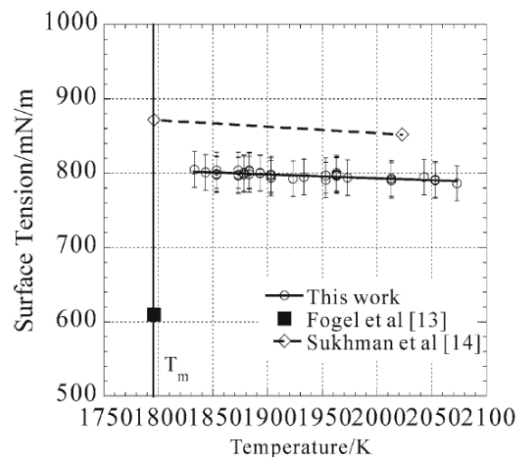


图 7 样品钇粘度的变化曲线

3.3 比热测量

材料样品比热的测量在材料科学领域内也是至关重要的。然而一般传统的方法会受到外界条件的一些干扰, 无法准确地得出结果, 所以也很难查出关于高熔点材料的准确比热值。在静电悬浮条件下, 可以填补这一领域的空白, 测出相对准确的比热值。深过冷比热测量计算原理如下:

m 是样品质量, M 是摩尔质量, C_p 是比热, ϵ_T



是温度 T 下的发射率, A 是样品面积, σ 是普朗克常量, T_m 是样品温度, T_{amb} 是环境温度, 是温度变化率。样品面积 A 可由密度测量的图像得到, 温度变化率由深过冷加工的降温曲线得到, 可以测量出深过冷加工样品的比热, 如下公式所示:

比热测量系统通过熔融样品在悬浮状态下凝固获取的降温曲线和发射率等参数, 计算样品在深过冷阶段的比热。温度及发射率测量单元通过双波长测温仪测量样品的温度、单波长测温仪结合样品温度测量样品的发射率、热电偶测量腔内的环境温度。系统采用双波长测温仪获取样品的温度, 通过双波长获取的温度代入单波长的计算公式, 反求出样品材料的发射率, 同时采用热电偶测量腔内的环境温度。

比热测量系统控制激光加热器的输出功率使样品加热熔化, 关闭激光器使样品降温凝固, 通过测温仪获得样品深过冷凝固的降温曲线, 如图 9 所示。注意, 由于液态样品和固态样品的发射率不同, 所以在图 9 有 2 个显著不同的阶段, 一个在加热融化时, 另一个在冷却时。如果仅仅分析深过冷曲线, 由比热的计算公式:

就可以求出。

可知是摩尔质量 M , 普朗克常量 σ 已知, 样品质量 m , 样品面积 A 在密度测量单元获得, 样品温度 T , 环境温度 T_{amb} 通过双波长测温仪和热电偶获得, 温度 T 下的发射率 ϵ_T 通过单波长测温仪结合温度计算获得, 温度变化率由深过冷加工的降温曲线 (AB 段斜率) 得到。

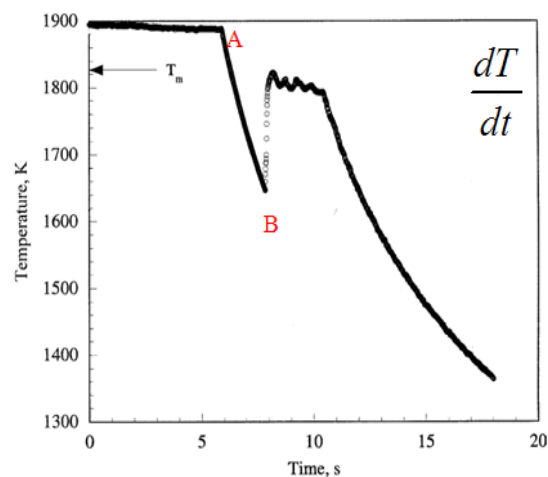


图 9 深过冷凝固降温曲线

在静电悬浮条件下, 硅样品经过多次加热冷却循环, 可以得到的稳定的时间温度曲线, 经过分析, 可以估计出样品硅的比热容和半球发射率的比值。再应用多项式分析方法在进一步拟合推导, 我们可以得到比热容与温度相关的函数和半球发射率与温度相关的函数。根据 Y. S. Sung 的在静电悬浮条件下测量 Si 的比热容和半球发射率的文章用纯度位 99.999% 的球形 Si 样品可以得到^[38],

$$c_p(T) = 3R + 4.8 \times 10^{-14} \times T + 4.157 \times 10^{-5} \times T^2 + 1.002 \times 10^{-8} \times T^3$$

4 总结与展望

采用静电悬浮的方法实现无容器技术, 可以不对样品产生额外的能量输入, 不对材料凝固过程产生额外的干扰因素, 易于结合其他非接触测量设备实现材料的热物性测量^[39,40]。通过对其他无容器方法介绍了解, 静电悬浮是材料科学领域内不可或缺的重要方法。目前, 国内可以实现在静电悬浮条件下实现对高温下的熔融样品的几种典型热物理性质的测量。可以获得相关参数不同样品的不同的变化关系。与美国日本等成熟的技术相比, 国内的相关实验仍有许多需要研究和改进的地方, 通过改进算法提高样品的悬浮成功率, 以及提高热物性测量的精度, 同时需要对电荷、形状变化等干扰进行修

正。这些问题都值得进一步研究和突破。

参考文献:

- [1] 周扬扬. 静电悬浮位置控制系统的设计[D]. 中国科学院研究生院(空间科学与应用研究中心), 2010.
- [2] Sung Y S, Takeya H, Togano K. Containerless solidification of Si, Zr, Nb, and Mo by electrostatic levitation[J]. Review of Scientific Instruments, 2001, 72(12):4419-4423.
- [3] Rulison A J, Watkins J L, Zambrano B. Electrostatic containerless processing system[J]. Review of Scientific Instruments, 1997, 68(7):2856-2863.
- [4] Meister T, Werner H, Lohoefer G, et al. Gain-scheduled control of an electrostatic levitator[J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(2):117-128.
- [5] Paradis P F, Ishikawa T, Yoda S. Electrostatic Levitation Research and Development at JAXA: Past and Present Activities in Thermophysics[J]. International Journal of Thermophysics, 2005, 26(4):1031-1049.
- [6] Paradis P F, Ishikawa T, Koike N. Non-contact measurements of the surface tension and viscosity of molybdenum using an electrostatic levitation furnace[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2007, 25(1):95-100.
- [7] Rhim W K, Chung S K, Barber D, et al. An electrostatic levitator for high-temperature containerless materials processing in 1-g[J]. Review of Scientific Instruments, 1993, 64(10):2961-2970.
- [8] 吕勇军. 声悬浮和自由落体条件下深过冷与快速凝固研究[D]. 西北工业大学, 2002.
- [9] 秦志成, 杨海清, 王文魁, 等. 落管——空间实验的地面模拟手段[J]. 现代物理知识, 1991(2).
- [10] Ludwig A, Wagner I, Laakmann J, et al. Undercooling of superalloy melts: basis of a new manufacturing technique for single-crystal turbine blades[J]. Materials Science & Engineering A, 1994, 178(1):299-303.
- [11] Hofmeister W H, Evans N D, Bayuzick R J, et al. Microstructures of niobium-germanium alloys processed in inert gas in the 100 meter drop tube[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 1986, 17(8):1421-1428.
- [12] Vinet B, Cortella L, Favier J J, et al. Highly undercooled W and Re drops in an ultrahigh - vacuum drop tube[J]. Applied Physics Letters, 1991, 58(1):97-99.
- [13] Jansen R, Sahm P R. Solidification under microgravity[J]. Materials Science & Engineering B, 1987, 26(1-2):199-212.
- [14] Muck, Electromagnetic levitation: German. 422004[P].1923
- [15] Okress E C, Wroughton D M, Comenetz G, et al. Electromagnetic levitation of solid and molten metals[J]. J. APPL. Phys., 1952, 23(5):525-547.
- [16] Begley R T, Comenetz G, Flinn P A, et al. Vacuum Levitation Melting[J]. Review of Scientific Instruments, 1959, 30(1):38-38.
- [17] 韩秀君. 亚稳金属熔体的热物理性质及其快速凝固研究[D]. 西北工业大学, 2002.
- [18] 魏炳波, Barth. 液态金属快速结晶的热力学驱动力[J]. 金属学报, 1994(7):289-293.
- [19] 王海鹏, 罗炳池, 常健, 等. 液态 Fe-Cu-Mo 合金的比热和相关热物理性质研究[J]. 中国科学, 2007, 37(3):273-281.
- [20] 向恒. BaTiO₃ 和 BaTiO₅ 陶瓷气动悬浮凝固及动力学研究[D]. 中国地质大学(北京), 2014.
- [21] 胡鹏飞. 声悬浮条件下氧化石墨烯纳米流体的过冷及成核特性研究[D]. 重庆大学, 2014.
- [22] 耿德路, 解文军, 洪振宇, 等. 声悬浮条件下 Ag-Cu 共晶合金的无容器凝固研究[J]. 中国科学:物理学力学天文学, 2011(3):227-235.
- [23] Wei B, Yang G, Zhou Y. High undercooling and rapid solidification of Ni 32.5% Sn eutectic alloy[J]. Acta Metallurgica Et Materialia, 1991, 39(6):1249-1258.
- [24] Wuerker R F, Shelton H, Langmuir R V. Electrodynamic Containment of Charged Particles[J]. Journal of Applied Physics, 1959, 30(3):342-349.
- [25] Wang T G, Trinh E, Rhim W K, et al. Development of an electrostatic positioner for space material processing [J]. Space material processing, 1984, 56(6):42-84
- [26] Won-Kyu Rhim, Sang K. Chung, Daniel Barber et al. An electrostatic levitator for high-temperature containerless materials processing in 1-g [J]. Rev Sci Instrum 1993, 64(8):46-832
- [27] TAI NAKAMURA Y A, HARUHIKO SHIMOJI ET AL. CONTROL SYSTEM OF ELECTROSTATIC LEVITATION FURNACE [J]. Acta Astronautica, 2000, 50(5):1-34
- [28] T. Meister, H. Werner, G. Lohoefer et al. Gain-scheduled Control of an Electrostatic Levitator [J]. Control Engineering Practice,

2003, 27(3):3-35

- [29] P.-F. Paradis, T. Ishikawa, S. Yoda. Electrostatic
- [30] Past and Present Activities in Thermophysics [J]. International Journal of Thermophysics, 2005, 26(1):23-34
- [31] Jianding Yua, Naokiyo Koshikawa et al. Containerless solidification of oxide material using an electrostatic levitation furnace in microgravity [J]. Journal of Crystal Growth, 2001, 231(9): 3-77)
- [32] Yasutomo Arai, Naokiyo Koshikawa, Takehiko Ishikawa et al. Specifications of a ground-based electrostatic levitation furnace and applications to the study of liquid properties [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2002, 314(4):75-388
- [33] 杨晓光,鲁晓宇,曹崇德. 材料静电悬浮控制系统的设计与应用 [J]. 西北工业大学学报, 2009, 27(4):25-255
- [34] Takehiko Ishikawa. Measurement of Thermal Properties of Refractory Metals Using Electrostatic Levitation Technique [D]. Tokyo; Tokyo Institute of Technology, 2001
- [35] Paul-Franc, ois Paradis, Takehiko Ishikawa et al. Experiments in materials science on the ground and in reduced gravity using electrostatic levitators [J]. Advances in Space

Levitation Research and Development at JAXA:

Research, 2008, 41(3):2-56

- [36] 郭景杰, 傅恒志. 合金熔体及其处理. 北京: 机械工业出版社, 2005.24
- [37] 周鲁.物理化学教程.北京:科学出版社, 2006.13
- [38] Paradis P F, Ishikawa T, Koike N. Thermophysical Properties of Molten Yttrium Measured by Non-contact Techniques[J]. Microgravity Science and Technology, 2009, 21(1-2):113-118.
- [39] Sung Y S, Takeya H, Hirata K, et al. Laboratory:High-Temperature Materials Science 2000-2004[J]. List of Publications 2000-2004, 2003, 83(6):1122 - 1124.
- [40] Ishikawa T, Paradis P F, Watanabe Y, et al. Thermophysical Properties of Liquid and Supercooled Rare Earth Elements Measured by an Electrostatic Levitator[J]. Jaxa Research & Development Report, 2009, 8:1-14.
- [41] 胡汉起, 金属凝固原理. 北京: 机械工业出版社, 2000.255